



Application No. 09/732,177
Paper Dated May 2, 2006
Notice of Allowance Dated April 14, 2006
Attorney Docket No. 0116-002064

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Application No. : 09/732,177 Confirmation No. 1420
Applicant : KENICHI HASEGAWA
Filed : December 7, 2000
Title : MAGNETIC FIELD GRADIENT COIL ASSEMBLY AND
METHOD OF DESIGNING SAME
Art Unit : 2123
Examiner : Ayal I. Sharon
Customer No. : 28289

Mail Stop ISSUE FEE
Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

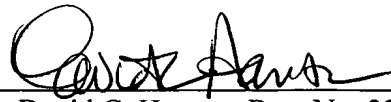
CLAIM FOR PRIORITY UNDER 35 U.S.C. § 119

Sir:

Attached hereto is a certified copy of Japanese Patent Application No. 11-347375 which corresponds to the above-identified United States patent application and which was filed in the Japanese Patent Office on December 7, 1999. The priority benefits provided by Section 119 of the Patent Act of 1952 are claimed for the above application.

Respectfully submitted,

THE WEBB LAW FIRM

By 
David C. Hanson, Reg. No. 23,024
Attorney for Applicant
700 Koppers Building
436 Seventh Avenue
Pittsburgh, PA 15219
Telephone: 412-471-8815
Facsimile: 412-471-4094
E-Mail: webblaw@webblaw.com

I hereby certify that this correspondence is being deposited with the United States Postal Service as first class mail in an envelope addressed to Commissioner for Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450 on May 2, 2006.

Lori A. Fratangelo
(Name of Person Mailing Paper)


Signature Date 05/02/2006

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

1999年12月 7日

出 願 番 号

Application Number:

平成11年特許願第347375号

ST.10/C]:

[JP1999-347375]

出 願 人

Applicant(s):

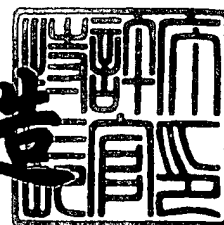
日本電子株式会社

CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT

2002年 4月 9日

特 許 庁 長 官
Commissioner,
Japan Patent Office

及 川 耕 造



【書類名】 特許願

【整理番号】 JE11A26H

【提出日】 平成11年12月 7日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G06F 19/00

【発明者】

【住所又は居所】 東京都昭島市武蔵野三丁目 1 番 2 号 日本電子株式会社
内

【氏名】 長谷川憲一

【特許出願人】

【識別番号】 000004271

【氏名又は名称】 日本電子株式会社

【代理人】

【識別番号】 100092495

【弁理士】

【氏名又は名称】 蛭川昌信

【選任した代理人】

【識別番号】 100088041

【弁理士】

【氏名又は名称】 阿部龍吉

【選任した代理人】

【識別番号】 100092509

【弁理士】

【氏名又は名称】 白井博樹

【選任した代理人】

【識別番号】 100095120

【弁理士】

【氏名又は名称】 内田亘彦

【選任した代理人】

【識別番号】 100095980

【弁理士】

【氏名又は名称】 菅井英雄

【選任した代理人】

【識別番号】 100094787

【弁理士】

【氏名又は名称】 青木健二

【選任した代理人】

【識別番号】 100097777

【弁理士】

【氏名又は名称】 菰澤 弘

【選任した代理人】

【識別番号】 100091971

【弁理士】

【氏名又は名称】 米澤 明

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 014867

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9100561

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 磁場勾配コイルの設計方法及び磁場勾配コイル

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 磁場勾配コイルを内側コイルと外側コイルを密巻コイルで構成して設計する方法であって、

内側コイルの個数と巻数を設定ないしは再設定し、遮蔽条件下で目標の磁場勾配強度の許容範囲内に入るようにその位置を最適化する段階、

外側コイルの個数と各巻数を設定する段階、

外側コイルに必要な電流分布のフーリエ成分を算出する段階、

電流分布のフーリエ成分を外側コイル位置を最適化して近似する段階、

内側と外側コイルの漏れ磁場を算出し、それによる渦電流による磁場歪みを計算する段階、

磁場歪みが許容範囲内に入らないとき、外側コイルの個数と各巻数を再設定する段階、

とからなる磁場勾配コイルの設計方法。

【請求項 2】 請求項 1 記載の方法で設計されたことを特徴とする磁場勾配コイル。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は核磁気共鳴（NMR）測定装置等に使用される磁場勾配コイルの設計方法、及び該方法で設計された磁場勾配コイルに関する。

【0002】

【従来の技術】

NMR測定装置において試料に立ち上がりが速い磁場パルスを加えるため、自己遮蔽型磁場コイルが採用されており、従来用いられているその設計手法について図1～図4により概略説明する。設計手法は、文献R.Tuner, A target field approach to optimal coil deasign, J.Phys.D:Appl.Phys.19,L147-L151(1986). 文献P.Mansfield and B.Chapman, Multishield Active Magnetic Screening of

coil Structures in NMR, J. Magn. Reso. 72, 211-223 (1987) の target field 法が利用される。target field 法は、計算で得られた仮想の内外コイルに流れる電流分布をさらに計算によって多数のコイルに分布させて近似する手法である。

【0 0 0 3】

図 1 は自己遮蔽型磁場コイルを実装した NMR 検出器の概略図、図 2 は設計計算の座標とコイルボビンを示す図、図 3 (a), (b) はそれぞれ内側コイルと外側コイルの概略図、図 4 は計算手順を示す図である。NMR 検出器は、図 1 に示すように、カバー 1、内側コイル 2、外側コイル 3、NMR 検出コイル 4 で構成される。この検出器において、図 2 に示すように、座標とコイルボビンは次の通りである。

5 1 円筒 1 … 半径 r_t (target) 目標磁場の円筒半径

5 2 円筒 2 … 半径 r_p (primary) 内側コイル半径

5 3 円筒 3 … 半径 r_s (screen) 外側コイル半径

5 4 円筒 4 … 半径 r_b (boundary) 境界半径

以下では内側コイルと外側コイルとにより、半径 r_b 境界上では磁場強度を 0 とし (自己遮蔽)、試料の置かれる半径 r_t では目標の磁場強度が得られるような磁場コイルを設計する。磁場解析に使うグリーン関数 $G(k)$ を次の (数 1) ~ (数 6) 式のように定義する。

【0 0 0 4】

【数 1】

$$B(z) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_p G(k) dk \quad \text{内側コイルが、} r_t \text{ 上に発生する磁場。}$$

$p, r = r_t$ $r_p \rightarrow r_t$

【0 0 0 5】

【数 2】

$$B(z) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_s G(k) dk \quad \text{外側コイルが、} r_t \text{ 上に発生する磁場。}$$

$s, r = r_t$ $r_s \rightarrow r_t$

【0 0 0 6】

【数 3】

$$B(z) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_p G(k) dk \quad \text{内側コイルが、} r_b \quad \text{計算上の境界半}$$

径上に発生する磁場

【0 0 0 7】

【数 4】

$$B(z) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_s G(k) dk \quad \text{外側コイルが} r_b \quad \text{計算上の境界半}$$

径上に発生する磁場

【0 0 0 8】

【数 5】

$$j(k)_p, j(k)_s: j(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ikz} J(z) dz \quad \text{により定義された内側、外側コイルの電流密度分}$$

布のフーリエ成分

【0 0 0 9】

【数 6】

$$G(k)_{r_p \rightarrow r_t} \quad G(k)_{r_s \rightarrow r_t} \quad G(k)_{r_p \rightarrow r_b} \quad G(k)_{r_s \rightarrow r_b} \quad \text{は、フーリエ空間でのそれぞれの電流—磁場 応答関}$$

数。

ここで、 $r_p \rightarrow r_t$ 、 $r_s \rightarrow r_t$ 、 $r_p \rightarrow r_b$ 、 $r_s \rightarrow r_b$ は、内側コイル、外側コイルがそれぞれ、半径 r_t 、半径 r_b 上に対して発生することを意味している。

(数 1) 式…内側コイルが r_t 上に発生する磁場

(数 2) 式…外側コイルが r_t 上に発生する磁場

(数 3) 式…内側コイルが r_b (計算上の境界半径) 上に発生する磁場

(数 4) 式…外側コイルが r_b (計算上の境界半径) 上に発生する磁場

(数 5) 式…内側、外側コイルの電流密度分布のフーリエ成分 $j(k)_p$ 、 $j(k)_s$ を

定義する式

(数 6) 式…フーリエ空間でのそれぞれの電流-磁場応答関数

次に、図 4 の計算手順に基づいて説明する。

ステップ S 1 :

目標磁場強度分布 TARGET(z) を設定する。ここで検出器円筒の中心軸付近でコイルが発生する磁場強度分布の目標値を定める。

ステップ S 2 :

目標磁場強度分布 TARGET(z) のフーリエ成分 target(k) を (数 7) 式により計算する。

【 0 0 1 0 】

【数 7】

$$target(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ikz} TARGET(z) dz$$

ステップ S 3 :

設計するコイルに合わせた電流-磁場グリーン関数 (応答関数) を求め、これと target(k) を使って、自己遮蔽する仮想の内外コイルに流れる電流分布のフーリエ成分 $j(k)_p$, $j(k)_s$ を計算する。

遮蔽条件 (境界 r_b 上で内外コイルの電流分布の各フーリエ成分による磁場の和が 0) での外側コイル電流分布のフーリエ成分 $j(k)_s$ は、内側コイル電流分布のフーリエ成分 $j(k)_p$ を使い、(数 8) 式となる。

【 0 0 1 1 】

【数 8】

$$j(k)_s = -j(k)_p \frac{G(k)_{r_p \rightarrow r_b}}{G(k)_{r_s \rightarrow r_b}} \text{ となる。}$$

したがって、内側、外側コイルが発生する磁場のフーリエ成分 $b(k)$ は、(

数 9) 式のようにになる。

【 0 0 1 2 】

【数 9】

$$b(k) = j(k)_p G(k)_{r_p \rightarrow r_i} + j(k)_s G(k)_{r_s \rightarrow r_i}$$

$$= j(k)_p \left(G(k)_{r_p \rightarrow r_i} - \frac{G(k)_{r_s \rightarrow r_i} G(k)_{r_p \rightarrow r_b}}{G(k)_{r_s \rightarrow r_b}} \right)$$

$b(k) = \text{target}(k)$ であるので、仮想の内側、外側コイルに流す電流分布のフーリエ成分 $j(k)_p$, $j(k)_s$ はそれぞれ、

【 0 0 1 3 】

【数 1 0】

$$j(k)_p = \frac{\text{target}(k)}{\left(G(k)_{r_p \rightarrow r_i} - \frac{G(k)_{r_s \rightarrow r_i} G(k)_{r_p \rightarrow r_b}}{G(k)_{r_s \rightarrow r_b}} \right)}$$

【 0 0 1 4 】

【数 1 1】

$$j(k)_s = -j(k)_p \frac{G(k)_{r_p \rightarrow r_b}}{G(k)_{r_s \rightarrow r_b}}$$

となる。

ステップ S 4 :

$j(k)_p$, $j(k)_s$ を逆フーリエ変換して仮想の内側、外側コイルに流れる電流分布 $J(z)_p$, $J(z)_s$ を求める。

ステップ S 5 :

仮想の内側、外側コイルに流れる電流分布 $J(z)_p$, $J(z)_s$ を積分計算し、計算した電流分布に合致する個々のコイルの位置を決定する。

【 0 0 1 5 】

【発明が解決しようとする課題】

上記従来の設計手法では、内側コイルと外側コイルの電流を同時に演算するため、電流分布の計算結果は理想的で、大きなコイルであればその通りに巻くことは可能であるが、コイルが小さくなるほど実現性の乏しい結果となる。すなわち、計算結果で得られた電流分布を得るため、計算で得られたコイル形状に合わせて電線をボビンに分布巻きすることが必要となるが、一般に計算で得られたコイル形状に一致させるため巻き数は多くなり、コイルが接近しすぎて完全に一致させるように巻くことは困難である。重ね巻きをすると、条件が変わってしまい、また巻数が少ないと、近似誤差が大きくなり、性能が低下する。巻数を多くして、さらに巻線の間隔を細かく設定して、目的の電流分布に高い精度で近似する必要があるが、現実的ではない。

【 0 0 1 6 】

また、NB (Narrow Bore) SMC (超伝導磁石) の場合、磁場勾配コイル内径をプローブカバーの内径の 5 0 % 以上にしたいが、以下の理由でできない。

それ以上大きくすると、外側コイルによって外に漏れる磁場のためにカバー上に発生する渦電流が大きくなり、立ち上がりを遅くする。それを避けるためには、コイルの巻数を増やして電線を細かく分布させて近似精度を良くして磁場の漏れを少なくすることが必要になるが、コイル抵抗や機械寸法の制約のため困難になる。さらに、DC の磁場勾配コイルと、数百メガ H z の検出コイルとの電氣的干渉が大きく、検出コイルの Q 値を下げてしまうので感度が低下する。その対策としては磁場勾配コイルの内側に RF シールドを設けることが考えられるが、このシールドと検出コイルとの干渉が大きいため同様に Q 値が下がってしまい効果がない。

【0017】

本発明は上記課題を解決するためのもので、近似精度がよく、簡単な構造で内径が大きく、また小型の自己遮蔽コイルを容易に設計することができ、高分解能 NMR に使えるほど応答が速い磁場勾配コイルが得られるようにすることを目的とする。

【0018】

【課題を解決するための手段】

本発明の磁場勾配コイルの設計方法は、磁場勾配コイルを内側コイルと外側コイルを密巻コイルで構成して設計する方法であって、内側コイルの個数と巻数を設定ないしは再設定し、遮蔽条件下で目標の磁場勾配強度の許容範囲内に入るようにその位置を最適化する段階、外側コイルの個数と各巻数を設定する段階、外側コイルに必要な電流分布のフーリエ成分を算出する段階、電流分布のフーリエ成分を外側コイル位置を最適化して近似する段階、内側と外側コイルの漏れ磁場を算出し、それによる渦電流による磁場歪みを計算する段階、磁場歪みが許容範囲内に入らないとき、外側コイルの個数と各巻数を再設定する段階とからなることを特徴とする。

また、本発明の磁場勾配コイルは、上記設計方法によって設計されたことを特徴とする。

【0019】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態について説明する。

以下の説明において、図 1 に示した構成の NMR 検出器、図 2 に示した設計計算の座標とコイルボビンを用いて説明する。従って、対象とする検出器における座標とコイルボビンは、

- 5 1 円筒 1 …半径 r_t (target) 目標磁場の円筒半径
- 5 2 円筒 2 …半径 r_p (primary) 内側コイル半径
- 5 3 円筒 3 …半径 r_s (screen) 外側コイル半径
- 5 4 円筒 4 …半径 r_b (boundary) 境界半径

で従来の説明と同じである。ここでの設計例では、 $r_t = 0$ 、 $r_p = 1.0$ 、 r

$s = 1.33$ 、 $r_b = 1.5$ とする。

【0020】

図5、図6は本発明の内外コイル構造を示す図で、本発明では所定幅に密に巻いたコイル（密巻コイル）を使用する。図5（a）は内側コイル構造、図5（b）は表面電流密度分布（Z軸+からみて右周りを+）、図6（a）は内側コイル構造、図6（b）は表面電流密度分布を示している。内側コイルは61、62で構成され、その寸法は密巻コイルの巻き幅 w_n^P 、中心位置 d_n^P （ $n=1$ ）、外側コイルは4個の密巻コイル71-1、71-2、71-3、71-4の4個と、密巻コイル72-1、72-2、72-3、72-4の4個から構成され、巻き幅 w_n^S 、中心位置 d_n^S （ $n=1, 2, 3, 4$ ）で表す。図7は本発明における計算手順を示すフローの図である。

ここで磁場解析に使うグリーン関数 $G(k)$ は従来の説明で使用した（数1）～（数6）式をそのまま使用する。この設計例でのグリーン関数値は図8に示す通りである。

【0021】

渦電流計算のためのグリーン関数については、プローブ内壁半径を r_{b1} 、その円周上で発生する渦電流の計算上の境界半径 r_{b2} とし、

$$r_p < r_s < r_{b1} < r_{b2}$$

として（数12）式～（数15）式のように定義する。

【0022】

【数12】

$$B(z) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_p G(k) dk$$

$r_p, r = r_{b2}$ $r_p \rightarrow r_{b2}$

【0023】

【数 1 3】

$$B(z) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_s G(k) dk$$

$s, r = r_{b2}$ $r_s \rightarrow r_{b2}$

【0 0 2 4】

【数 1 4】

$$B(z) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_{b1} G(k) dk$$

$b1, r = r_{b2}$ $r_{b1} \rightarrow r_{b2}$

【0 0 2 5】

【数 1 5】

$$B(z) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_{b1} G(k) dk$$

$b1, r = r_i$ $r_{b1} \rightarrow r_i$

ここで、 $j(k)_{b1}$ はプローブ内壁に発生する渦電流のフーリエ成分である。

次に、図 7 の計算手順に基づいて説明する。

ステップ S 1 1 :

実際の製作を考慮して、内側コイルを構成する密巻コイルの個数と各巻数を設定する。ここで密巻コイルの巻き幅 w_n^P の値が決まる。

ステップ S 1 2 :

グリーン関数を使い、遮蔽条件下で内側コイルの位置を最適化する（歪み項 z^3 、 z^5 などを最小にする）。ここでは、完全な外側コイルがあり、完全に遮蔽されていると仮定する。

【0 0 2 6】

内側コイルの電流分布は、（数 1 6）式のように表される。

【0 0 2 7】

【数 1 6】

$$J(z)_p = \frac{I}{D^p} \sum_{n=1}^{N_p} \left[-H(z + d_n^p - w_n^p/2)(1 - H(z + d_n^p - w_n^p/2)) \right. \\ \left. + H(z - d_n^p + w_n^p/2)(1 - H(z - d_n^p + w_n^p/2)) \right]$$

ここで、

D^p : 内側コイルの線材の直径

$j(z)$: 電流分布関数

$H(z)$: ヘビサイド関数

である。密巻コイルのため電流分布がパルス状になりこのように表される。ここ
密巻コイルは中心を対象に 2 個であるので $N_p = 1$ であり、中心位置 d_n^p (n
 $= 1$) が最適化すべき変数である。

【0 0 2 8】

この電流分布のフーリエ成分は、電流分布が Z 軸に対して奇関数なため (数 1
7) 式のように表される。

【0 0 2 9】

【数 1 7】

$$j(k)_p = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ikz} J(z)_p dz \\ = \frac{I}{D^p} \sum_{n=1}^{N_p} \frac{2i}{k} \left\{ -\cos(k(d_n^p - w_n^p/2)) + \cos(k(d_n^p + w_n^p/2)) \right\}$$

外側コイルより外では、磁場が完全に打ち消されるように外側コイルに流す電
流分布は、 r_b 計算上境界で磁場 = 0 として (数 1 8) 式のように表される。

【0 0 3 0】

【数 1 8】

$$B_{p,r=r_b}(z) = - B_{s,r=r_b}(z)$$

この条件を電流密度フーリエ成分で表すと外側コイルの電流密度分布のフーリエ成分は、グリーン関数と $j(k)_p$ を用いて表すと、(数 1 9) 式のように表される。

【0 0 3 1】

【数 1 9】

$$j(k)_s = - j(k)_p \frac{G(k)_{r_p \rightarrow r_b}}{G(k)_{r_s \rightarrow r_b}}$$

外側コイルにより磁場遮蔽されている条件での、内外コイルが中心で発生する磁場強度は (数 2 0) 式、(数 2 1) 式で表される。

【0 0 3 2】

【数 2 0】

$$B(z)_{r=r_i} = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_p G(k)_{r_p \rightarrow r_i}^{screen} dk$$

【0 0 3 3】

【数 2 1】

$$G_{r_p \rightarrow r_t}^{screen}(k) = G_{r_p \rightarrow r_t}(k) - \frac{G(k)G(k)}{G(k)} \frac{r_p \rightarrow r_b \quad r_s \rightarrow r_t}{r_s \rightarrow r_b}$$

(数 2 1) 式のグリーン関数を使い、内側コイルの電流分布でコイルの磁場強度の計算を (数 2 2) 式のように行うことができる。

【0 0 3 4】

【数 2 2】

$$\begin{aligned} B(z) &= \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_p G_{r_p \rightarrow r_t}^{screen}(k) dk \\ &= \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ 1 + (ikz) + \frac{1}{2!}(ikz)^2 + \frac{1}{3!}(ikz)^3 + \dots \right\} \left[\frac{I}{D^p} \sum_{n=1}^{N_p} \frac{2i}{k} \{ -\cos(k(d_n^p - w_n^p/2)) + \cos(k(d_n^p + w_n^p/2)) \} \right] G_{r_p \rightarrow r_t}^{screen}(k) dk \\ &= \frac{I}{D^p} \frac{2\mu}{\pi} \int_0^{+\infty} \left\{ z - \frac{1}{3!}k^2z^3 + \frac{1}{5!}k^4z^5 \dots \right\} \left[\sum_{n=1}^{N_p} \{ \cos(k(d_n^p - w_n^p/2)) - \cos(k(d_n^p + w_n^p/2)) \} \right] G_{r_p \rightarrow r_t}^{screen}(k) dk \\ &= I \frac{2\mu}{\pi} \{ Q_1(d, w) \cdot z + Q_3(d, w) \cdot z^3 + Q_5(d, w) \cdot z^5 \dots \} \end{aligned}$$

電流分布が奇関数のため偶数次項はない。そして、コイルが発生する磁場成分 Z の一次項 (磁場勾配強度) Q_1 、3 次項 (歪み) Q_3 はそれぞれ (数 2 3) 式、(数 2 4) 式であらわされる。ここで、磁場歪み Q_3 を最小にする d_n^p を求める。

【0 0 3 5】

【数 2 3】

$$Q_1(d_n^p, w_n^p) = \frac{2\mu}{\pi} \sum_{n=1}^{N_p} \int_0^{+\infty} \{ \cos(k(d_n^p - w_n^p/2)) - \cos(k(d_n^p + w_n^p/2)) \} G_{r_p \rightarrow r_t}^{screen}(k) dk$$

【0 0 3 6】

【数 2 4】

$$Q_3(d_n^p, w_n^p) = -\frac{2\mu}{3!\pi} \sum_{n=1}^{N_p} \int_0^{+\infty} k^2 \left\{ \cos(k(d_n^p - w_n^p/2)) - \cos(k(d_n^p + w_n^p/2)) \right\} \overset{\text{screen}}{G(k)} dk$$

設計例における最適値は、

$$d_1^p = 0.89, w_1^p = 0.63$$

である。

ステップ S 1 3、S 1 4：

磁場歪みが許容範囲でなければ、内側コイルの構成を再設定してステップ S 1 2 に戻って再度やり直す。

ステップ S 1 5：

磁場歪みが許容範囲内であると、外側コイルを構成する密巻コイルの個数と各巻数を設定する。ここで密巻コイルの巻き幅 w_n^s の値が決まる。

ステップ S 1 6：

外側コイルに要求される電流分布のフーリエ成分は、 r_b 計算上境界で磁場が 0 となる条件で（数 2 5）式のように表される。

【0 0 3 7】

【数 2 5】

$$j(k)_s = -j(k)_p \frac{G(k)_{r_p \rightarrow r_b}}{G(k)_{r_s \rightarrow r_b}}$$

ステップ S 1 7：

電流分布のフーリエ成分 $j(k)_s$ を外側コイル位置を最適化して近似する。
従来の設計方法では、 $j(k)_s$ を逆フーリエ変換して電流分布を求め、多数の電線を分布させて近似させていたが、本発明では、以下のように外側コイルに要求される電流密度分布フーリエ成分 $j(k)_s$ をステップ S 1 5 であらかじめ設定された少数の密巻外側コイルで近似する。

【0038】

図8に示したように、 k が大きい領域での応答関数は指数関数的に減衰している。したがって、本発明のこの設計例の場合、 $k = 1 \sim 1.5$ 程度までの低域の近似で十分なことが分かる。 $j(k)_s$ は(数26)式で表され、

【0039】

【数26】

$$j(k)_s = -j(k)_p \frac{G(k)}{G(k)}_{r_p \rightarrow r_h} \\ = -\frac{I}{D^s} \sum_{n=1}^{N_s} \frac{2i}{k} \left\{ -\cos\left(k(d_n^s - w_n^s/2)\right) + \cos\left(k(d_n^s + w_n^s/2)\right) \right\} + error(k)$$

D : 外側コイルの巻線ピッチ

d_n^s : コイル組上下 (+、-位置)

w_n^s : コイル密巻幅

ここで $error(k)$ が k の低域で最小になるように数値計算で最適化を行う。

計算により最適値は、

$$\begin{aligned} d_1^s &= 0.41 & w_1^s &= 0.13 \\ d_2^s &= 0.41 & w_2^s &= 0.20 \\ d_3^s &= 1.12 & w_3^s &= 0.26 \\ d_4^s &= 1.73 & w_4^s &= 0.066 \end{aligned}$$

図9は設計例の境界上の磁場のフーリエ成分を示す図であり、primary (内側コイル)、screen (外側コイル)、primary + screenコイル、screen ($n = 1, 2, 3, 4$)コイルの磁場フーリエ成分を示している。ここで、内側コイル、外側コイルによる磁場のフーリエ成分は、(数27)式、(数28)式のように表される。

【0040】

【数 2 7】

$$b(k)_{primary} = j(k)_p \underset{r_p \rightarrow r_b}{G}(k)$$

【0 0 4 1】

【数 2 8】

$$b(k)_{screen} = j(k)_s \underset{r_s \rightarrow r_b}{G}(k)$$

ステップ S 1 8 :

グリーン関数を用いて、内側と外側コイルの漏れ磁場を計算し、それによる渦電流による磁場歪みを計算する。

渦電流が流れるプローブ内壁半径 r_{b1} に理想的なコイル半径 r_{b1} があると仮定する。渦電流の発生により、それにより外には磁場が漏洩できないことを理想的なコイルで置き換えて計算を行う。 r_{b1} での電流のフーリエ成分は (数 2 9) 式のように表され、それによる r_t 上での磁場は (数 3 0) 式のように表される。

【0 0 4 2】

【数 2 9】

$$j(k)_{b1} = \left[\frac{I}{D^p} \sum_{n=1}^{N_p} \frac{2i}{k} \left\{ -\cos(k(d_n^p - w_n^p/2)) + \cos(k(d_n^p + w_n^p/2)) \right\} \underset{r_p \rightarrow r_{b1}}{G}(k) - \frac{I}{D^s} \sum_{n=1}^{N_s} \frac{2i}{k} \left\{ \dots \right\} \underset{r_s \rightarrow r_{b1}}{G}(k) \right] \underset{r_{b1} \rightarrow r_{b2}}{1 \over G(k)}$$

【0 0 4 3】

【数 3 0】

$$B(z)_{b1, r=r_t} = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} j(k)_{b1} \underset{r_{b1} \rightarrow r_t}{G}(k) dk$$

この逆フーリエ変換を行うことで渦電流による磁場歪みが得られる。

ステップ S 1 9、S 2 0 :

磁場歪みが最小または許容範囲内であれば設計は終了し、許容範囲内になけれ

ば外側の密巻コイルを構成する密巻コイルの個数、巻数を再設定してステップ S 1 6 からやり直す。

【 0 0 4 4 】

なお、上記設計例では内側密巻コイルを 2 個としたが、勿論本発明はこれに限定されるものではなく、複数のコイル対で構成して線形性を向上させることができる。また、外側コイルは、渦電流による磁場をゼロにできる数に変更することができる。また、Z 軸以外にも X、Y 軸磁場勾配コイル、例えば馬蹄型コイルの設計にも適用可能であり、従来設計での指紋型コイルは複数の馬蹄型コイルで近似可能である。さらに、上記設計例では内外の 2 重コイルとしたが、3 重以上のコイルにも拡張可能である。

【 0 0 4 5 】

【発明の効果】

以上のように本発明によれば、電流近似の計算をフーリエ成分で行うことで、簡単な構造の自己遮蔽コイルを設計することができ、近似の精度が良いので、簡単な構造で内径の大きなコイルを容易に設計可能であり、また、小型のコイルが設計できる。

また、実現性のあるコイル形状を初期モデルとして設定して演算するので、最終的なコイル形状に無理が生じない。

また、内外コイルの各コイルを独立に演算するのでそれぞれのコイル形状に自由度が大きく、渦電流による磁場歪みがゼロになるように条件設定するので、応答性の良好なコイルを設計することができる。

【 0 0 4 6 】

また、本発明では、従来の設計法と同様に内側コイルと外側コイルに同時に電流を流して磁場を発生させ、外側コイルは完全に磁場を遮蔽しないので、検出器のカバー上には渦電流が発生するが、渦電流は互いに磁場を相殺し、磁場の歪みが小さく、かつ磁場エネルギーが小さいため、渦電流は速く減衰し、そのため、従来設計法と同様な磁場応答性が得られ、高分解能 NMR 測定に使用可能である。また、磁場コイルの内径が大きく、内側コイルの内径はカバー内径の 7 0 % 以上の大きさが可能であり、検出コイルとの干渉が少ないので感度を低下させるこ

とがない。また、感度を低下させることなく、内側に断熱管や R F シールドを実装することも可能である。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 自己遮蔽型磁場コイルを実装した検出器の概略図である。

【図 2】 設計計算の座標とコイルボビンを示す図である。

【図 3】 内側コイルと外側コイルの概略図である。

【図 4】 従来法における計算手順を示す図である。

【図 5】 本実施の形態における内側コイル構造を示す図である。

【図 6】 本実施の形態における外側コイル構造を示す図である。

【図 7】 本発明における計算手順を示すフローを示す図である。

【図 8】 設計例でのグリーン関数値を示す図である。

【図 9】 設計例の境界上の磁場のフーリエ成分を示す図である。

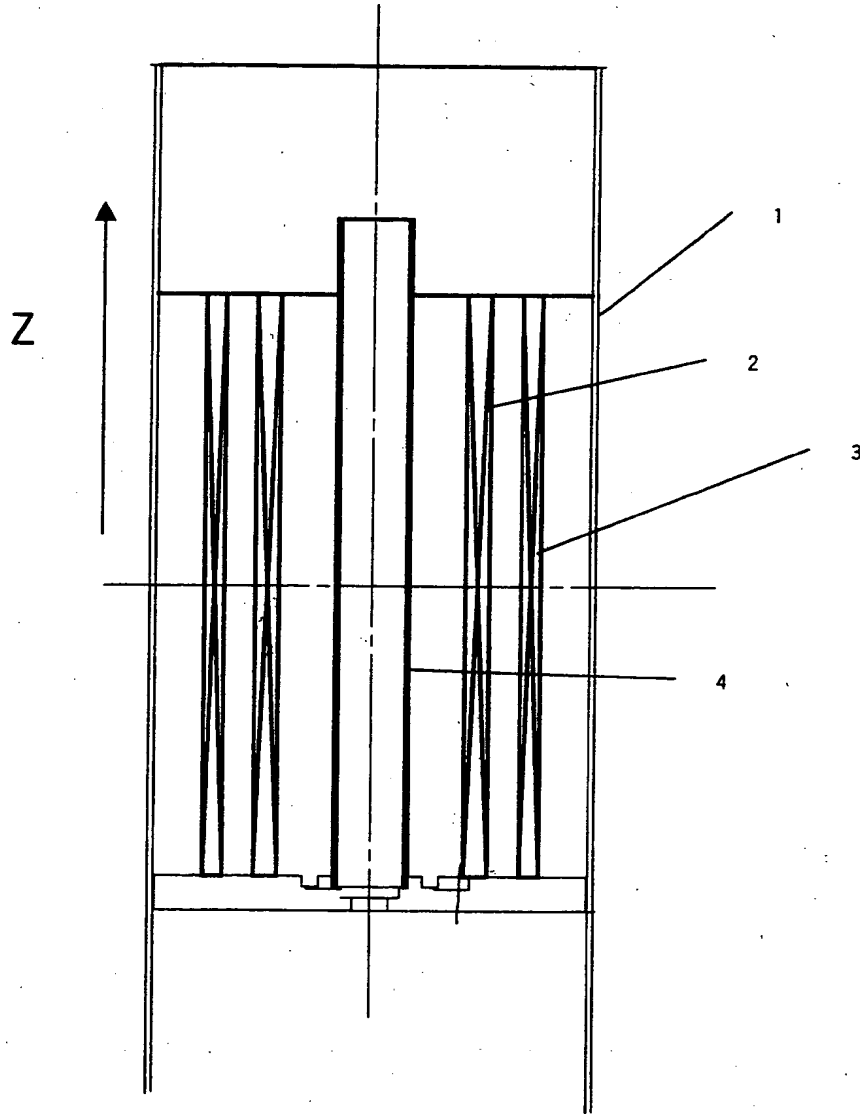
【符号の説明】

1 …カバー、 2 …内側コイル、 3 …外側コイル、 4 …NMR 検出コイル、 5 1 …円筒 1、 5 2 円筒 2、 5 3 …円筒 3、 5 4 …円筒 4。

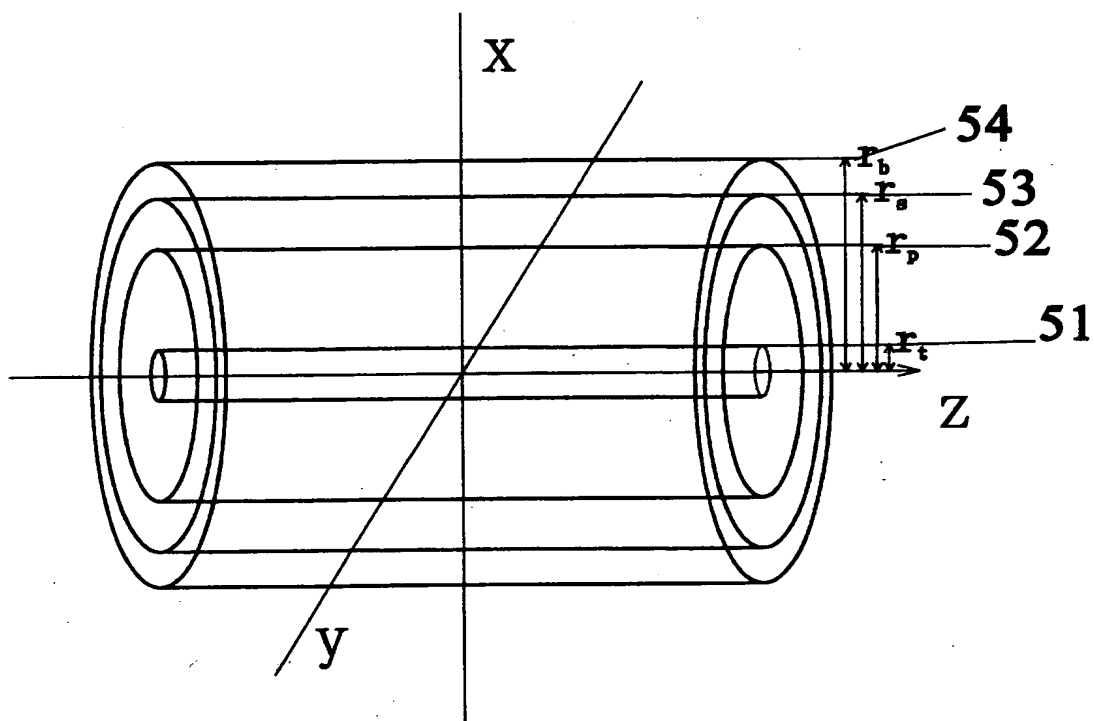
【書類名】

図面

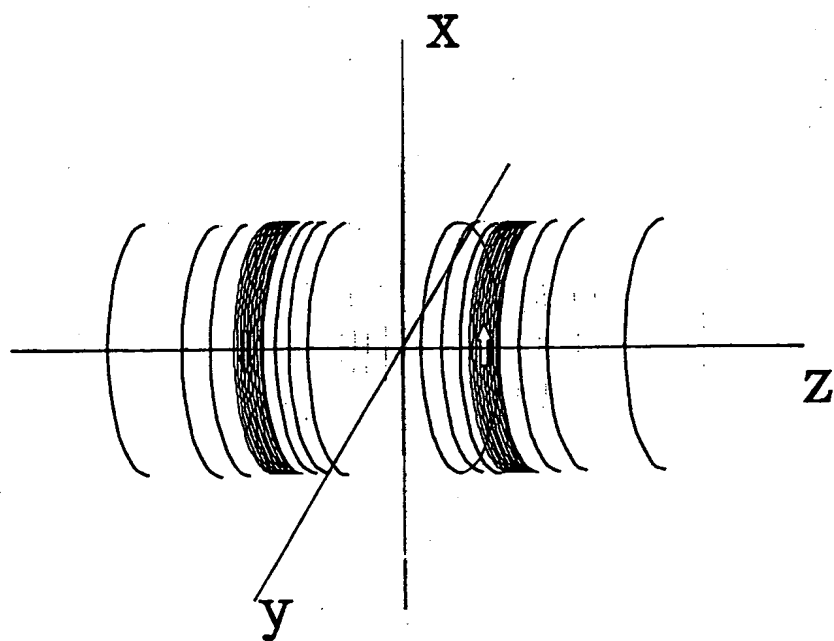
【図 1】



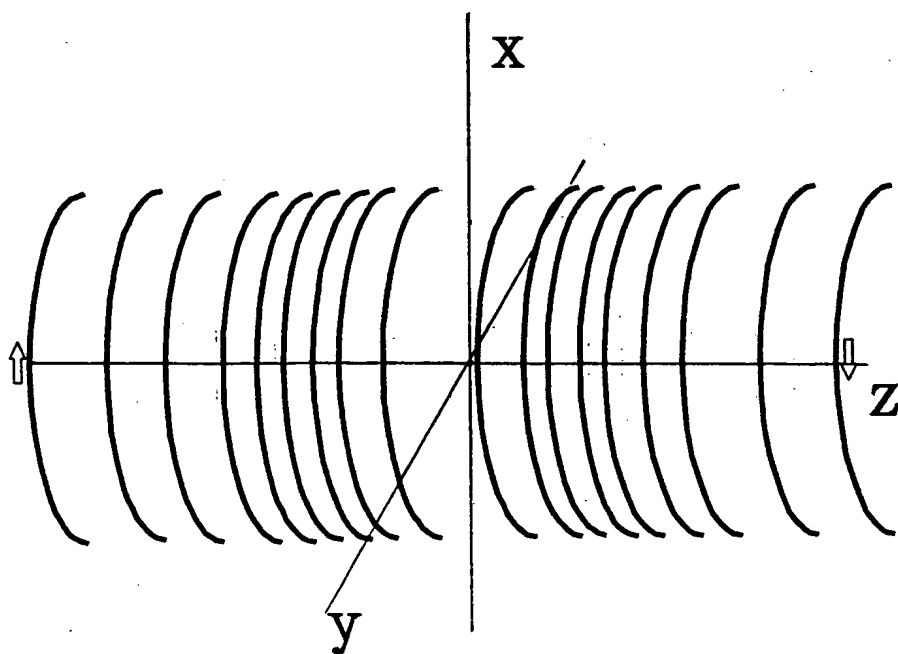
【図 2】



【図 3】

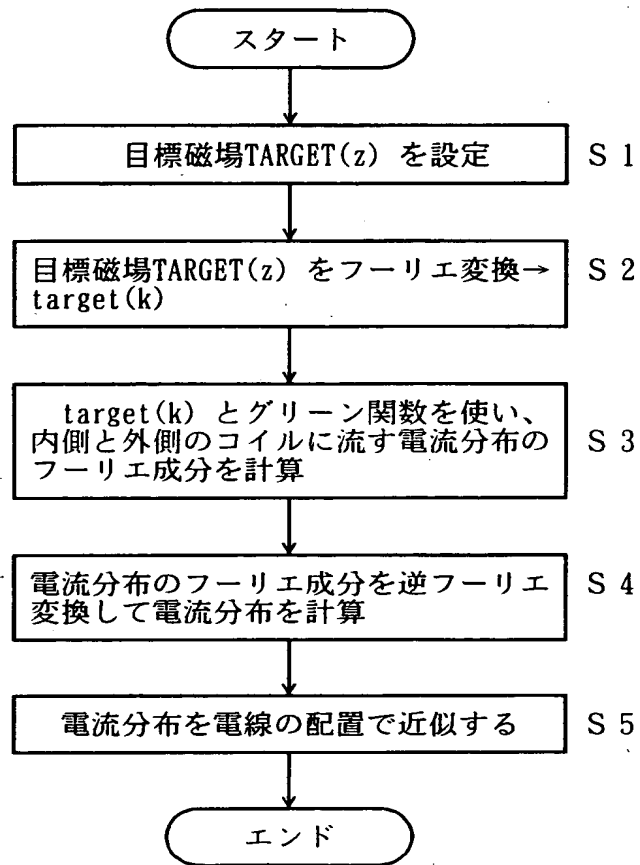


(a)

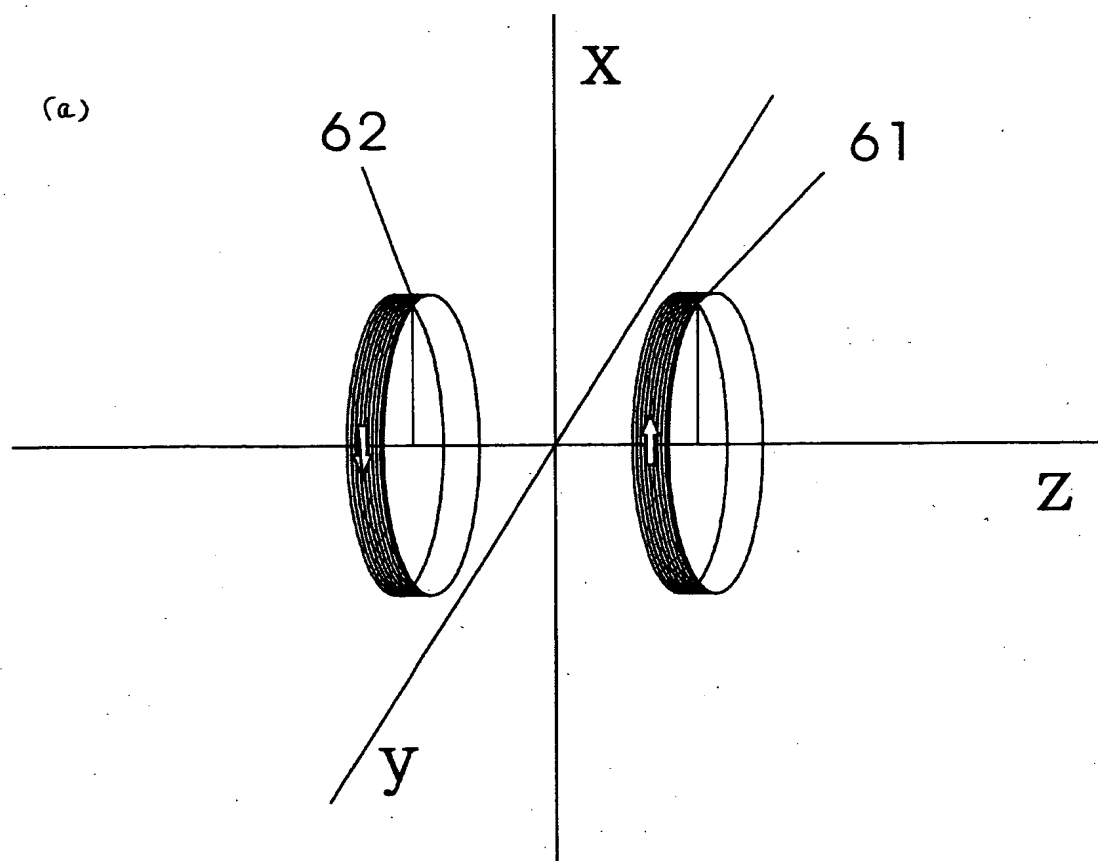


(b)

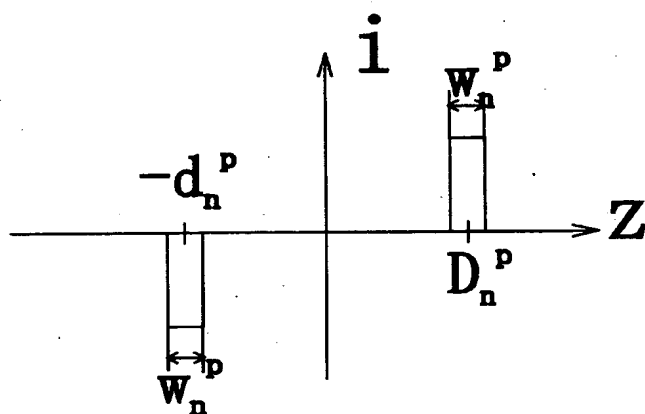
【図 4】



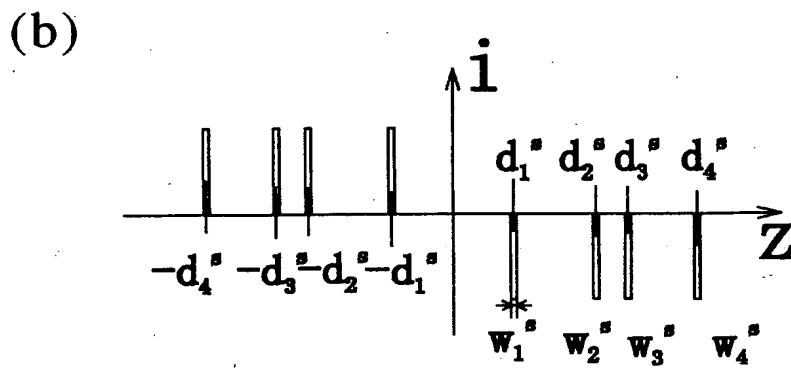
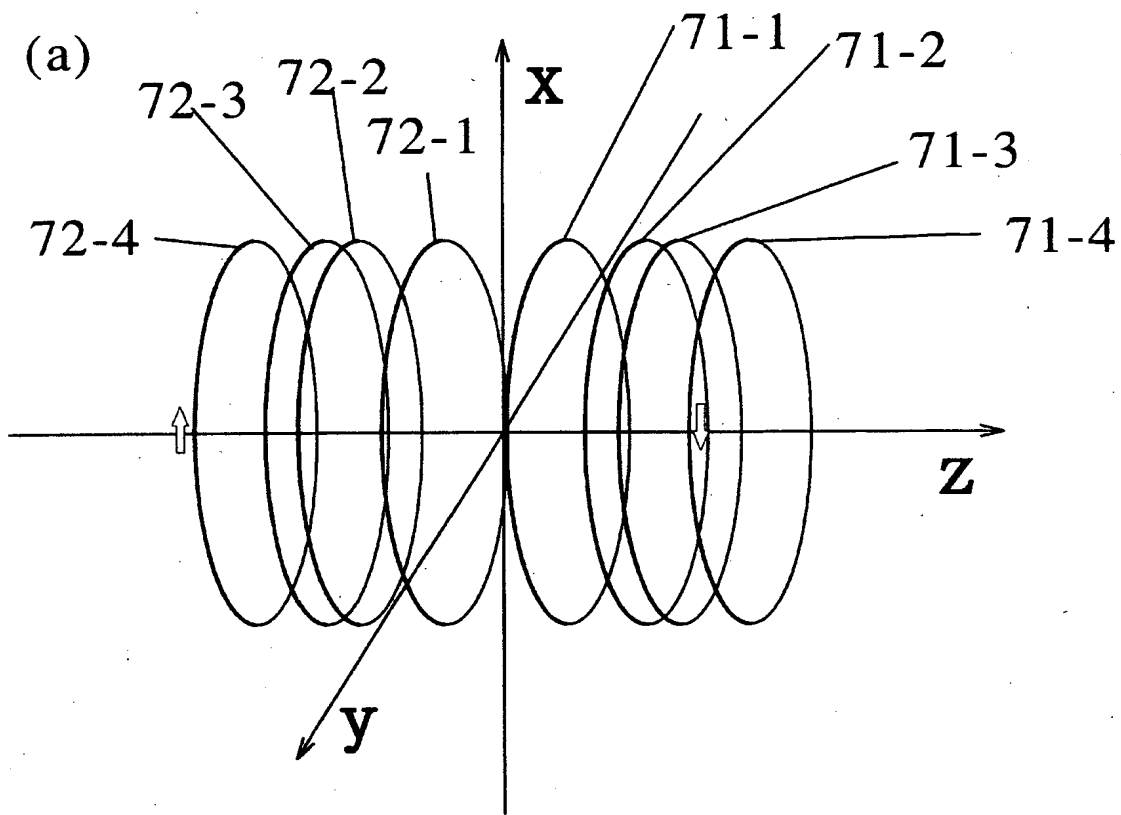
【図 5】



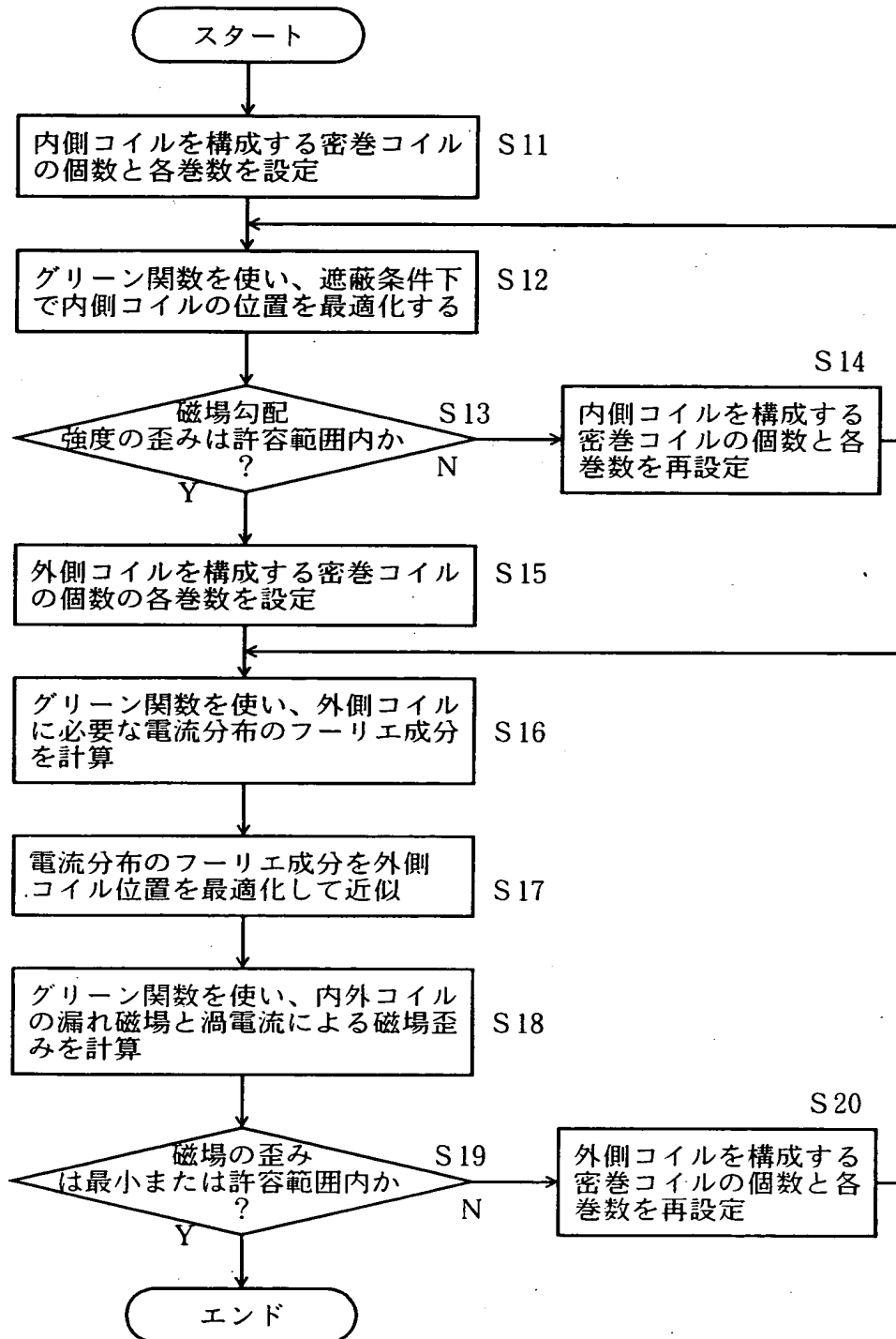
(b)



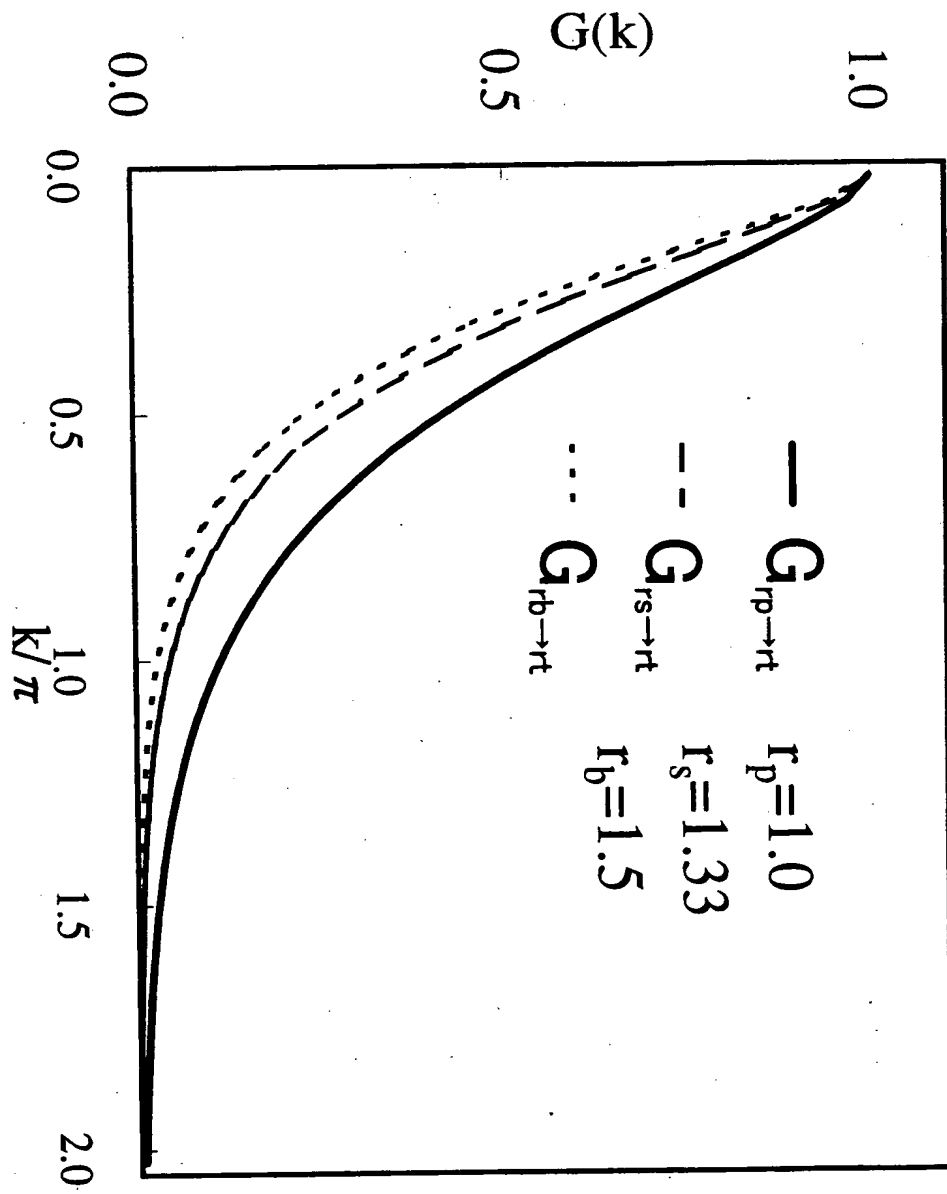
【图 6】



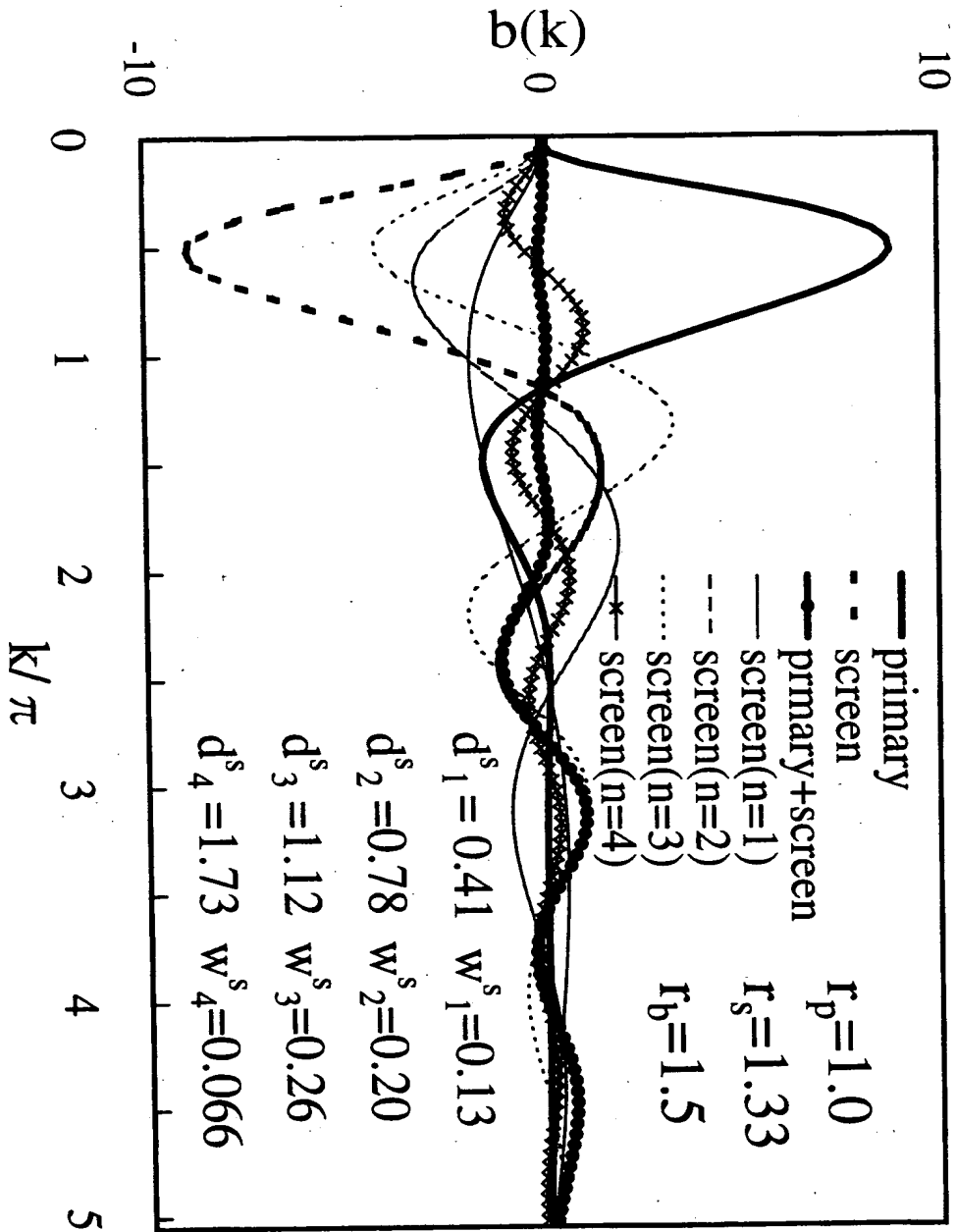
【図 7】



【図 8】



【图 9】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 近似精度がよく、簡単な構造で内径が大きく、小型の自己遮蔽コイルを容易に設計可能にする。

【解決手段】 密巻の内側コイルの個数と巻数を設定ないしは再設定し、遮蔽条件下で目標の磁場勾配強度の許容範囲内に入るようにその位置を最適化する段階、密巻の外側コイルの個数と各巻数を設定する段階、外側コイルに必要な電流分布のフーリエ成分を算出する段階、電流分布のフーリエ成分を外側コイル位置を最適化して近似する段階、内側と外側コイルの漏れ磁場を算出し、それによる渦電流による磁場歪みを計算する段階、磁場歪みが許容範囲内に入らないとき、外側コイルの個数と各巻数を再設定する段階とからなるようにしたものである。

【選択図】 図 7

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000004271]

1. 変更年月日 1990年 8月 7日

[変更理由] 新規登録

住 所 東京都昭島市武蔵野3丁目1番2号

氏 名 日本電子株式会社